

José I Carreto IraurgiInstituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero,
Mar del Plata

Mareas rojas

Ytoda el agua del Nilo se convirtió en sangre. Los peces del Nilo murieron y el río dio un olor tan pestilente que los egipcios ya no pudieron beber sus aguas. Entonces hubo sangre en todo el territorio de Egipto', dice la Biblia (Éxodo, 7, 20-21), y se convierte así en el primer testimonio escrito acerca del cambio de color que puede sufrir la superficie de un cuerpo de agua. Sin embargo, es probable que las mareas rojas se hayan producido mucho antes de que existieran las palabras, hace ya cientos de millones de años, en los remotísimos tiempos en que aparecieron los organismos que las causan.

Según narra en sus *Naufragios* Álvar Núñez Cabeza de Vaca, el México precolombino conocía el peligro de comer moluscos extraídos al comienzo del año, época de las mareas rojas. Pero últimamente su frecuencia e intensidad han aumentado de manera significativa. Nuevas áreas se han visto afectadas y entre 1985 y 1988 se detectaron fenómenos producidos por especies inadvertidas hasta entonces por los planctólogos.

Las consecuencias de las mareas rojas suelen ser severas, incluso dramáticas, ya que cuando son tóxicas llegan a ser fatales para el hombre y otros consumidores de moluscos bivalvos. En 1987, durante la primera marea tóxica detectada en Guatemala, se registraron 201 intoxicaciones humanas de carácter grave; 26 de ellas resultaron fatales.

Pero hemos de ilustrar ahora las cuantiosas pérdidas económicas que estos fenómenos suelen provocar. Constituyen, por ejemplo, el mayor problema de la industria de pesca costera del Japón. En la costa de Harina Nada, la marea roja de 1972 produjo la muerte de 14 millones de peces limón con un costo aproximado de 70 millones de dólares, y es este solo un caso de los muy frecuentes y devastadores que se suscitan en la región.

También suelen ser cuantiosas las pérdidas causadas por declinación del turismo, y en este sentido baste recordar que en el estado de Florida, Estados Unidos, durante la temporada 1973-1974, dichas pérdidas se estimaron en 15 millones de dólares. Más recientemente, en

¿DE QUÉ SE TRATA?

Las mareas rojas, florecimientos extraordinarios de microorganismos muchas veces tóxicos, son catástrofes naturales inevitables y casi siempre impredecibles. Su frecuencia e intensidad se han incrementado notablemente en los últimos años, pero no podemos asegurar que esa alteración sea propia de nuestro tiempo ya que podríamos estar atravesando tan solo una fase dentro de un ciclo de larga duración... De hecho, el problema es, hoy, extremadamente grave y debemos por tanto preguntarnos cuáles son las condiciones actuales —¿disminución de la capa de ozono?, ¿hipernutricación de las aguas?— que favorecen esta expansión. Conocer los factores determinantes del fenómeno ha de facilitar, obviamente, la solución del problema.

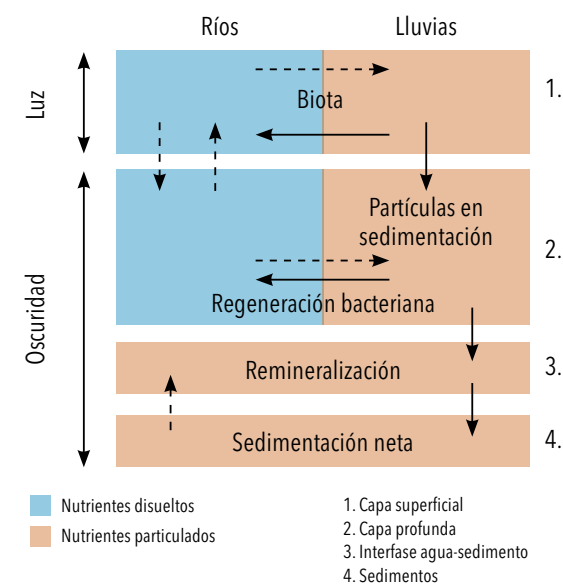
FITOPLANCTON: CICLO DE NUTRIENTES EN EL OCÉANO

El ciclo de los elementos biogénicos de los ecosistemas terrestres se desarrolla en la superficie de terrenos sólidos, mientras que el de los ecosistemas acuáticos transcurre en todo el espesor de un volumen líquido. La figura esquematiza el ciclo de nutrientes disueltos o particulados en una columna de agua oceánica. La fotosíntesis, la generación de la mayoría de los organismos y la formación del material particulado tienen lugar en la capa superficial iluminada, donde se desarrolla la biota.

Las fuentes de nutrientes más importantes son la regeneración in situ que se opera a través del metabolismo de los seres vivos presentes y los aportes que proporciona el fondo oceánico mediante procesos de surgencia o afloramiento. Las contribuciones externas realizadas por los ríos y las lluvias solo proveen el 1% de los requerimientos.

La circulación de elementos biogénicos desde las grandes profundidades oceánicas hacia las capas superficiales más iluminadas es, normalmente, un proceso lento que retarda la multiplicación celular. Los factores físicos que generan mezcla vertical aceleran dicho proceso, resultando así importantes agentes reguladores en la producción de fitoplancton.

Las pérdidas de nutrientes se producen principalmente por el hundimiento de partículas de detrito que provienen de la capa superficial. En la capa profunda, los nutrientes se regeneran a través del proceso de descomposición parcial del material particulado provocado por acción bacteriana. Al fondo oceánico,



donde se alojan los sedimentos, solo llegan las partículas de mayor dimensión. Estas son remineralizadas en la interfase agua-sedimento y los nutrientes disueltos pasan a la fase líquida por difusión y bioturbación del sedimento. Solo el 1% de este material se incorpora a la fase sólida como sedimentación neta.

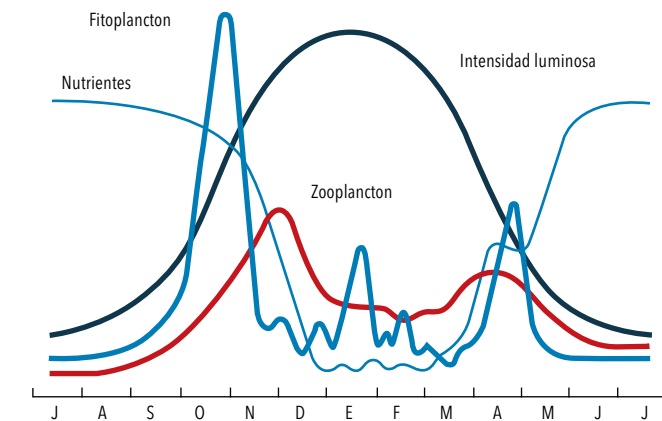


Figura 1. Variaciones estacionales de la disponibilidad de nutrientes y de luz y su correlación con la abundancia del fito y zooplacton en mares templados.

conocido como afloramiento o surgencia. Sin embargo, cuando la turbulencia del sistema es excesiva, la reproducción de los microorganismos se retarda a causa de la dispersión del fitoplancton fuera de la capa iluminada.

Las diferentes formas de vida compiten entre sí por la captura de los nutrientes disponibles en dicha etapa. En la competencia entre diatomeas y dinoflagelados, el resultado está determinado no solo por el ritmo de reproducción celular o por la velocidad con que asimilan los

nutrientes. Los dinoflagelados se dividen una vez cada uno o dos días, mientras que las diatomeas lo hacen dos o tres veces por día. Sin embargo, la menor velocidad de división celular se ve compensada en los dinoflagelados por su mayor motilidad y fitotrofismo positivo que les permite concentrarse en la capa iluminada. Las diatomeas están más expuestas al hundimiento, pero requieren menos luz que los dinoflagelados. El resultado de la competencia dependerá de las condiciones impuestas por el ambiente, y el ambiente marino varía mucho según las regiones y según la época del año. Por ejemplo, en los mares templados, donde los cambios estacionales son muy intensos, se producen períodos de rápido crecimiento y decadencia de la población fitoplanctónica (figura 1). Durante el invierno, debido a la fuerte mezcla vertical provocada por el viento, el fitoplancton dispone de nutrientes, pero la baja radiación luminosa limita su crecimiento. En la primavera, con el incremento de la radiación luminosa y la disminución de la intensidad de los vientos, se calienta la capa superficial y la mezcla vertical o turbulencia comienza a disminuir. En estas condiciones, el fitoplancton puede permanecer en la capa iluminada, todavía rica en nutrientes, situación que permite un incremento exponencial del número de células. Este pulso de producción denominado 'florece-

1988, la zona costera de Puerto Montt, Chile, se vio afectada por una marea roja de graves consecuencias para la salmonicultura. El perjuicio económico ocasionado fue de unos 14 millones de dólares.

Como las inundaciones, los terremotos y los incendios forestales, estas catástrofes naturales son inevitables y casi siempre impredecibles, pero sus efectos pueden minimizarse si se actúa con eficacia y serenidad en los casos de emergencia. La necesidad de explorar la naturaleza íntima de estos fenómenos resulta, entonces, evidente, y con este propósito hemos de introducirnos en el mundo del fitoplancton (del griego *fito*, vegetal, y *plankton*, errante).

El fitoplancton está compuesto por plantas microscópicas celulares que pueblan las capas superficiales de todos los cuerpos de agua tanto dulce como marina. Utilizando la luz solar como fuente de energía, ellas transforman sustancias simples que obtienen del medio ambiente en la materia orgánica necesaria para su crecimiento y multiplicación. Este es uno de los procesos más importantes del planeta, ya que constituye el primer eslabón de la compleja trama alimentaria acuática. Todos los animales acuáticos deben su subsistencia, en forma directa o indirecta, a la multiplicación celular de estas plantas microscópicas.

Diatomeas, flagelados y dinoflagelados son, por su cantidad, los grupos de algas más importantes que componen el fitoplancton. Se distinguen entre sí por las formas de vida o estrategias reproductivas adoptadas en el curso de su evolución en un medio dinámico y cambiante. Todas ellas requieren luz suficiente para poder multiplicarse, condición que solo se da en una capa superficial delgada (comparemos sus 80 metros de promedio con los 4000 metros promedio de las grandes profundidades oceánicas). También requieren sustancias biogénicas imprescindibles para su metabolismo, por ejemplo sales nutrientes (nitratos, fosfatos, silicatos), oligoelementos (hierro, cobre, manganeso, zinc, etcétera) y algunas sustancias orgánicas (vitaminas, ácidos húmicos, etcétera).

El ciclo de los elementos biogénicos transcurre en todo el espesor del mar, y su circulación desde las grandes profundidades a las capas iluminadas es un proceso lento que generalmente retarda la multiplicación celular del fitoplancton (ver 'Fitoplancton: ciclo de nutrientes en el océano'). Los procesos físicos que generan mezcla vertical aceleran el retorno de nutrientes a las capas iluminadas y son, en consecuencia, importantes factores regulares de la producción fitoplanctónica. Las áreas más fértiles del océano son aquellas en las que el agua profunda es forzada a elevarse hacia la superficie, fenómeno

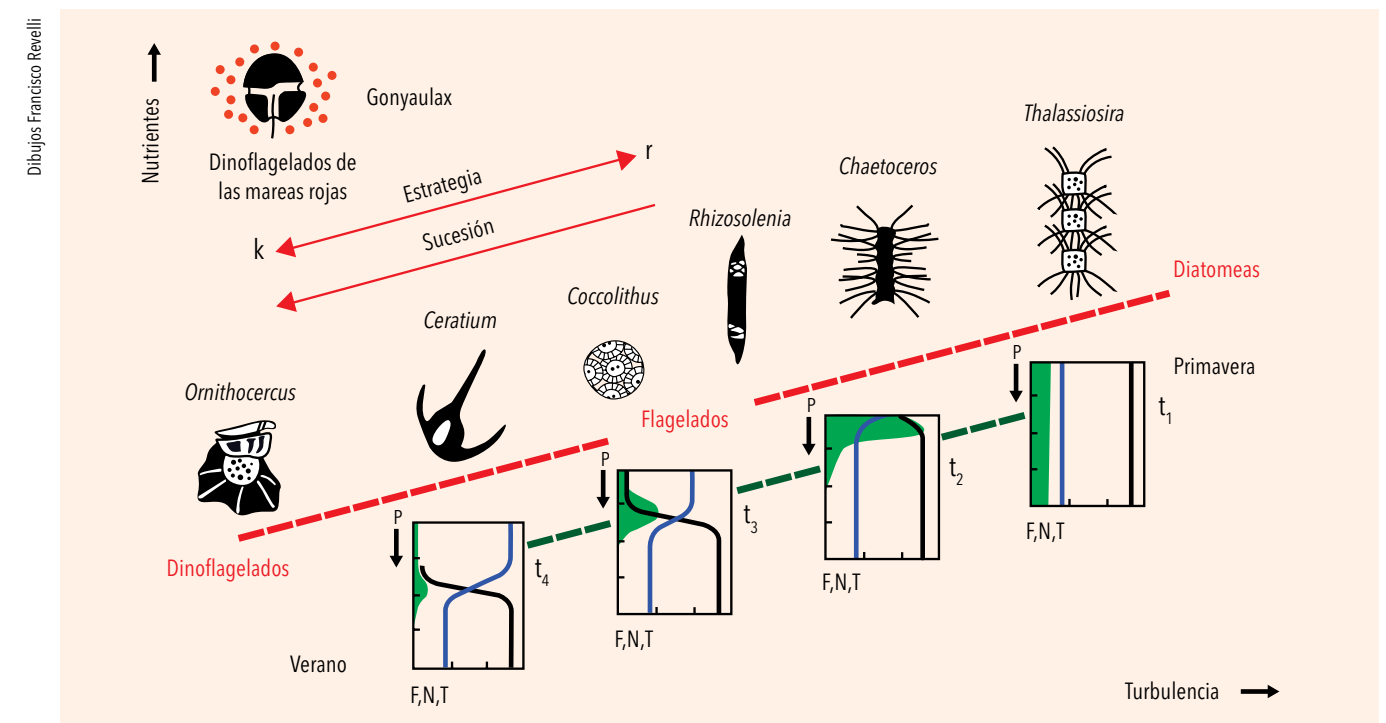
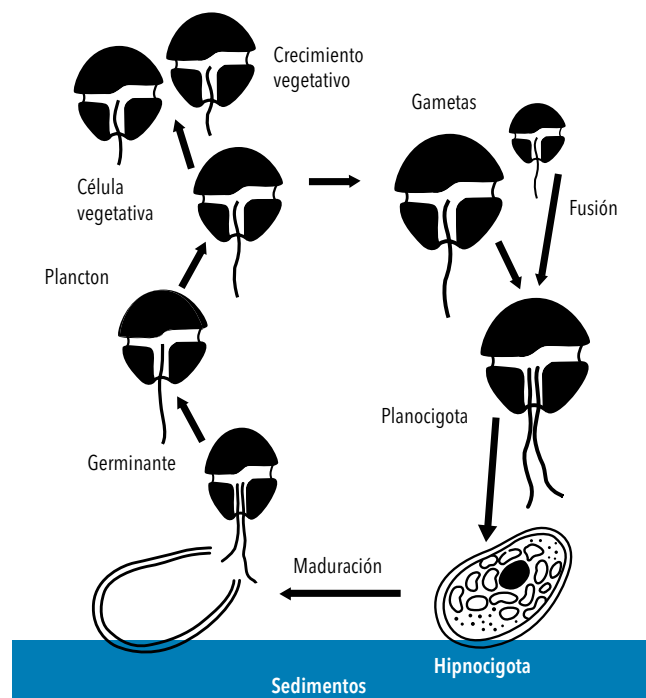
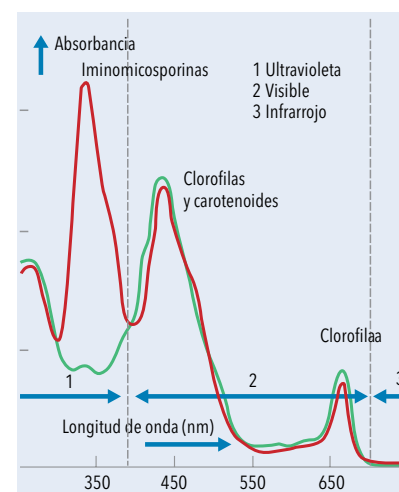


Figura 2. Esquema simplificado de la secuencia principal de la sucesión fitoplanctónica. Se observa el sucesivo reemplazo de formas de vida que imponen su estrategia reproductiva (r) en un ambiente rico en recursos, por otras más eficientes (k) capaces de explotar los medios cada vez más pobres en nutrientes impuestos por el consumo y la limitación de la mezcla vertical. La sucesión de especies es causada y corre paralela a la disminución de nutrientes y turbulencia de la capa iluminada. Los dinoflagelados formadores de mareas rojas son solo componentes menores de esa secuencia principal. Su estrategia está diseñada para explotar ambientes 'anómalos' donde se combinan elevadas concentraciones de nutrientes con baja turbulencia. Para diversos tiempos, t_1 , se esquematiza la concentración de nutrientes, N (línea negra), la temperatura, T (línea azul) y la abundancia de fitoplancton, F (zona verde), en función de la profundidad en la columna oceánica, P. Modificada de R Margalef, 1978, *Oceanologica Acta*, vol. 1, pp. 493-509.



Figuras 3 y 4.

Arriba: ciclo de vida del dinoflagelado tóxico *Alexandrium excavatum*. Derecha: espectros de absorción de extractos metanólicos del dinoflagelado *A. excavatum*, según crezca en altas (curva roja) o bajas (curva verde) intensidades luminosas.



miento primaveral' lo inician las diatomeas, que con su mayor velocidad de división celular alcanzan su máxima densidad una o dos semanas después de haber comenzado el florecimiento. Su decadencia es también rápida ya que la disminución de nutrientes obliga a una correlativa disminución de la velocidad de división celular a punto tal que ya no alcanza a compensar las pérdidas debidas al hundimiento y al consumo por parte de un número creciente de pequeños animales plantónicos (zooplankton) a los que sirve de alimento.

A medida que disminuyen los nutrientes y se incrementa la estabilidad vertical, las diatomeas son gradualmente reemplazadas por otras formas de vida mejor adaptadas a las nuevas condiciones del medio. La secuencia principal se caracteriza por una sucesión de especies: primero las diatomeas de gran tamaño, luego otras más pequeñas reemplazadas a su vez por células móviles de velocidades de

crecimiento intermedias (flagelados y pequeños dinoflagelados) y, finalmente, ya en el verano, los grandes dinoflagelados capaces de alimentarse de bacterias, pequeñas diatomeas y pequeños dinoflagelados (figura 2).

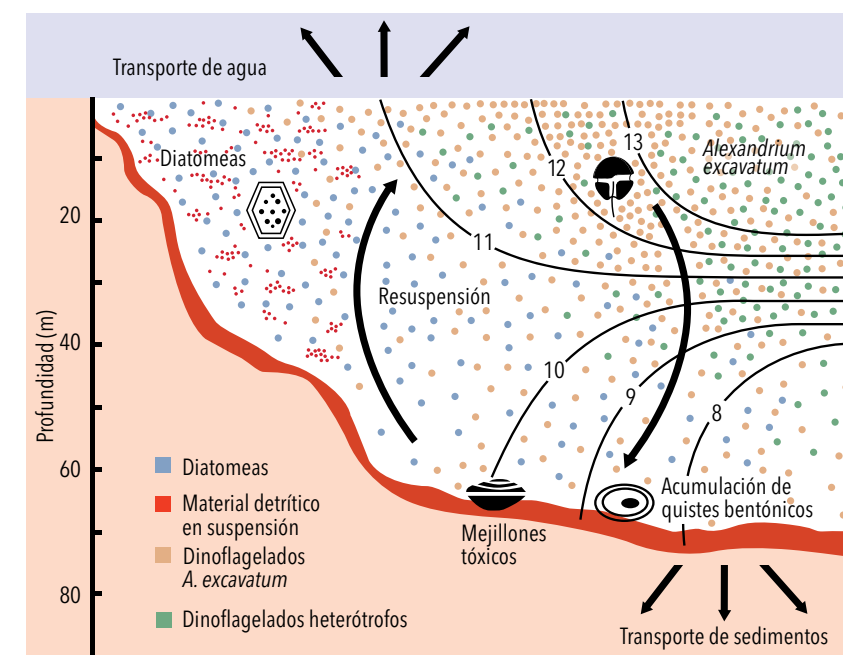
Diversos procesos, tales como descargas de ríos, surgencias costeras, inestabilidad en los bordes del talud, mareas y fuerzas originadas en la rotación terrestre, producen modificaciones locales en la abundancia de nutrientes y en la estabilidad vertical. Estas situaciones pueden dar origen a otros pulsos de producción, no necesariamente primaverales, originados en el crecimiento de alguna de las especies de la secuencia principal. En ciertos casos, la perturbación origina un ambiente peculiar en el que se combinan abundancia de nutrientes, elevada estabilidad vertical y disponibilidad de luz. La evolución ha diseñado formas de vida capaces de explotar estos ambientes 'anómalos' y de llegar a producir en ellos florecimientos excepcionales, las así llamadas 'mareas rojas'.

Las mareas rojas son florecimientos caracterizados por la escasa diversidad de la población fitoplanctónica y las excepcionalmente elevadas concentraciones celulares que se alcanzan (de un millón a mil millones de células/litro). Se produce así un cambio en la coloración de la superficie del mar que puede tomar distintos matices (amarillo, naranja, rojo, pardo...) de acuerdo con la naturaleza y concentración de los organismos presentes, sobre todo según la cantidad y el tipo de pigmentos que contienen. La expresión 'marea roja', aunque no la más apropiada para describir estos fenómenos, es un término popular que ha sido adoptado por la mayoría de los científicos. Entre los diversos organismos responsables de ellas, los dinoflagelados pequeños y redondeados, frecuentes portadores de potentes neurotoxinas, son los agentes causales más comunes.

En la dinámica de los florecimientos planctónicos se distinguen tres etapas: iniciación, crecimiento y decadencia de la población. Un cuarto estadio, el de acumulación, caracteriza a las mareas rojas. La iniciación está relacionada con el ciclo de vida de los dinoflagelados. Este ciclo presenta dos fases: una de crecimiento vegetativo por simple división celular que da lugar al florecimiento extraordinario de la especie; otra, de reproducción sexual, que posibilita la existencia de una reserva en estado latente pronta a proveer los ejemplares que iniciarán una nueva proliferación en el momento adecuado. La figura 3 ejemplifica, con el caso del dinoflagelado tóxico *Alexandrium excavatum*, dicho ciclo de vida que pasamos a describir. La fusión de las gametas origina una cigota móvil con dos flagelos, la planocigota, esta sufre un proceso que pasa por la rotura de la teca y la consecuente liberación de protoplasma que, rodeado de una delgada membrana, acentúa su forma ovoide y se transforma posteriormente, con el engrosamiento de su pared por medio de una sustancia polimérica muy

MAREAS ROJAS EN LA PENÍNSULA VALDÉS

En 1980 y como consecuencia de la muerte de dos pescadores del buque *Constanza* que operaba en la zona de la península Valdés, se detectó el primer episodio de envenenamiento por ingestión de moluscos bivalvos del Mar Argentino. La sintomatología de las intoxicaciones y el análisis de las toxinas coincidieron en señalar la existencia de 'veneno paralizante de moluscos' en los mejillones del área. La presencia del dinoflagelado *Alexandrium excavatum*, su cultivo y posterior análisis toxicológico, permitieron identificarlo como el organismo productor de las mencionadas toxinas. La distribución espacial de este organismo, en forma de manchas, estaba relacionada con las marcadas discontinuidades físico-químicas de área, que no habían sido advertidas anteriormente. Cerca de la costa, las aguas eran más frías y verticalmente homogéneas en relación con las más alejadas, de mayor temperatura superficial y fuertemente estratificadas. Entre ambas se pudo detectar una línea o estrecha zona de transición que se conoce con el nombre de 'zona frontal'. La imagen satelital infrarroja



Corte vertical perpendicular a la costa de la región marina. Precisamente en esa zona es donde ocurre el frente de mareas.

permite apreciar la posición de esta zona indicando una brusca variación de la temperatura superficial.

La presencia en los sedimentos del área de numerosos quistes de reposo nos permitió predecir la repetición del fenómeno en la próxima primavera; se inició entonces un sistema de monitoreo de toxinas en moluscos bivalvos. El corte perpendicular a la costa —donde se indican isoterma con temperaturas expresadas en grados centígrados— presenta una visión esquemática del florecimiento ocurrido en 1981. En las aguas costeras homogéneas predominan las diatomeas (puntos azules) y el material detrítico en suspensión (tonalidad marrón). En esta área la distribución homogénea de las propiedades del medio es consecuencia de la fuerte mezcla vertical inducida por las corrientes de marea. En la capa superficial del área de transición, el predominio del dinoflagelado tóxico *A. excavatum* es casi total (puntos rojos) y está flanqueado en la zona estratificada por otro dinoflagelado heterótrofo (puntos verdes) que preda intensamente sobre él. La iniciación de un nuevo florecimiento supone la resuspensión y el transporte de los quistes presentes en el sedimento hacia la zona iluminada. La expansión del área tóxica en el verano de 1980-1981 pudo originarse en el transporte de los quistes formado durante 1980. Otro mecanismo de dispersión es el transporte tanto de células vegetativas como de quistes de reposo por los movimientos laterales del agua. Finalmente, la 'lluvia' de células tóxicas (vegetativas y quistes) es consumida por los mejillones del banco, que se tornan altamente tóxicos. Nuevos estudios han demostrado que en este sistema frontal también se producen florecimientos de otras especies de fitoplancton no tóxico. Las razones por las cuales predomina una especie tóxica o una no tóxica son hasta ahora desconocidas.



Imagen satelital infrarroja (AVHRR) que permite apreciar la separación de aguas costeras de menor temperatura superficial (tonos claros) de las aguas adyacentes que registran una mayor temperatura (tonos oscuros), característica de los meses cálidos.

resistente, en una hipnógota o quiste de reposo. Luego de un período obligado de maduración en reposo, y cuando se rompe la pared celular en uno de los polos, se produce la germinación. El individuo expulsado posee dos flagelos y, al dividirse, repite las formas vegetativas iniciales. Las variables ambientales influyen en el crecimiento de los dinoflagelados, afectando la transformación de sus formas móviles (planctónicas) en células enquistadas (bentónicas) y viceversa. Esta transformación puede considerarse una simple alternancia anual entre una célula móvil biflagelada (primavera-verano) y una célula bentónica inmóvil (invierno), sin olvidar sus diversas fases intermedias. Pasado el período de reposo, la mezcla vertical lleva a esta célula a la zona iluminada, restaurándose entonces la forma móvil e iniciándose el crecimiento vegetativo. Pero, ¿qué condiciones del ambiente favorecen el éxito de esta especie frente a sus eventuales competidores y le permiten multiplicarse hasta producir un florecimiento casi uniespecífico? La respuesta parece encontrarse en los ambientes excepcionales antes mencionados donde se combinan elevadas concentraciones de nutrientes, baja turbulencia y altas intensidades luminosas. (El recuadro 'Mareas rojas en la península Valdés' describe un interesante caso del fenómeno que nos ocupa.) Bajo las condiciones recién indicadas, los dinoflagelados aventajan a las diatomeas a causa de su movilidad y fototrofismo positivo. La falta de movilidad propia vuelve a las diatomeas proclives al hundimiento y en ausencia de turbulencia no pueden acceder a los nutrientes de la capa iluminada.

En una etapa inicial, cuando abundan los nutrientes, los dinoflagelados se acumulan ceca de la superficie,

donde la radiación luminosa es elevada. Esta estrategia parece requerir un sistema de fotoprotección, sobre todo de la radiación ultravioleta, ya que las dosis naturales son suficientes para inhibir la fotosíntesis y la división celular. Se ha observado recientemente que los dinoflagelados formadores de mareas rojas poseen un mecanismo protector capaz de cumplir esta función: ciertas sustancias actúan como filtros o pantallas de la radiación cuya longitud de onda se encuentra entre los 280 y los 390nm (figura 4). Estas sustancias solo parecen estar presentes en grupos de algas muy primitivas, desarrolladas cuando la capa de ozono en formación no debía resultar un filtro eficiente para la radiación ultravioleta. La presencia de estos mecanismos ha sido interpretada como una adaptación genética que confiere ventajas competitivas a los dinoflagelados en condiciones de alta intensidad luminosa y cortas longitudes de onda. Esta parece ser una adecuada explicación para la permanente correspondencia observada entre el desarrollo de mareas rojas uniespecíficas y los ambientes excepcionales ya descriptos.

La explotación de los nutrientes de una delgada capa superficial del mar no explica el elevado número de células presentes en la marea roja. Dos tipos de fenómenos parecen ser los que posibilitan la supervivencia de estas grandes concentraciones de microorganismos: las migraciones verticales de los propios dinoflagelados y la dinámica del mar. Con respecto al primero de estos fenómenos, cabe señalar que aun cuando los nutrientes se hayan agotado durante el día, los dinoflagelados permanecen en la superficie asimilando anhídrido carbónico y acumulando en consecuencia carbohidratos. Esta reserva energética y la presencia de enzimas capaces de reducir

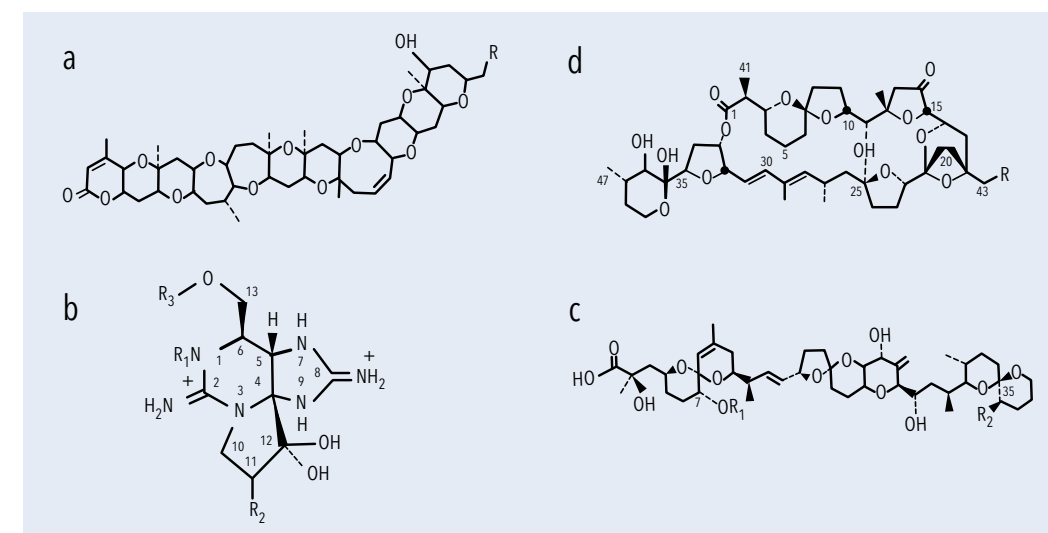


Figura 7. Estructura general de algunas toxinas producidas por dinoflagelados: a) neurotoxinas del grupo de la brevetoxina-B; b) neurotoxinas del grupo de la saxitoxina; c) toxinas diarreas del grupo okadaico, y d) toxinas diarreas del grupo de las pectenotoxinas.

los nitratos en la oscuridad les permiten sumergirse y explotar los nutrientes de capas algo más profundas. Este ritmo migratorio parece ser bastante complejo pues, según se ha observado experimentalmente, existen comportamientos grupales. Esta puede ser la clave que explique la distribución en forma de manchas que se suele observar en una marea roja. El segundo de los factores señalados, la dinámica del mar, engloba fenómenos como corrientes convergentes, frentes hidrográficos o mareas internas (figura 5). Su importancia determinante en el estado de acumulación se demuestra por el hecho de que la cantidad de nitrógeno celular en las manchas mencionadas excede, en mucho, al que resultaría de la asimilación del nitrógeno inicialmente existente en la columna de agua. Queda probada así la existencia de aportes exteriores a dicha columna. En algunos casos estos mecanismos físicos son los únicos responsables del fenómeno de concentración de material boyante en mareas rojas producidas por organismos no fotosintetizadores como huevos de peces, zooplancton o aun por ciertos tipos de dinoflagelados.

El estado de acumulación de una marea roja puede durar desde unos pocos días hasta varios meses, según el consumo realizado por los organismos predadores del zooplancton. Un consumo escaso suele estar asociado a ciertas propiedades específicas de las poblaciones de flagelados, entre otras, la formación de mucílago y toxinas, bioluminiscencia y producción de metabolitos específicos con propiedades antibióticas que no solo los protegen de los predadores sino que pueden llegar a inhibir el crecimiento de otras especies fitoplanctónicas. El proceso se puede interrumpir por diversas causas, en especial por la limitación de aquellos factores antes mencionados como necesarios para el crecimiento y la acumulación uniespecífica: la reducción de nutrientes, ciertas modificaciones climáticas e hidrológicas, etcétera.

La propagación de las mareas rojas por diseminación de los quistes de reposo que pueden ser transportados como finas partículas de sedimento por las corrientes marinas queda ilustrada por los sucesos ocurridos en la zona de la península Valdés en 1980 y sus posteriores consecuencias (véanse 'Mareas rojas en la península Valdés' y figura 6). Aun cuando la superficie afectada fue relativamente pequeña, los estudios posteriores han demostrado la existencia de quistes dispersos por toda el área patagónica, incluso hasta la latitud de Mar del Plata.

Las mareas rojas producen la muerte masiva de organismos marinos por dos razones básicas. La primera está relacionada con el consumo total del oxígeno disuelto en la columna de agua, fenómeno causado por la respiración nocturna y la descomposición final de la masa de algas. En estas condiciones, la mayoría de los animales marinos mueren por anoxia, es decir, por falta de oxígeno. Si el área afectada es de grandes dimensiones, se producen muertes masivas especialmente de las formas bentónicas que tienen movilidad restringida. La segunda razón se vincula al hecho de que algunas algas formadoras de mareas rojas, en especial ciertos dinoflagelados, son productoras de potentes toxinas. Esta circunstancia resulta particularmente compleja por el hecho de que distintas especies de algas producen distintas toxinas. Podemos hacer una primera y muy importante distinción según el peligro real que entrañen para el hombre: las que se comportan como venenos efectivos para la mayoría de los organismos marinos no tienen, obviamente, grandes posibilidades de afectarlo; aquellas que solo tienen efectos nocivos sobre los vertebrados son, por el contrario, extremadamente peligrosas ya que se concentran en ciertos invertebrados marinos sin dañarlos y así pueden llegar hasta el hombre, consumidor, por ejemplo, de moluscos bivalvos.

Determinar la naturaleza de las toxinas presentes en los microorganismos causantes (o no) de mareas rojas

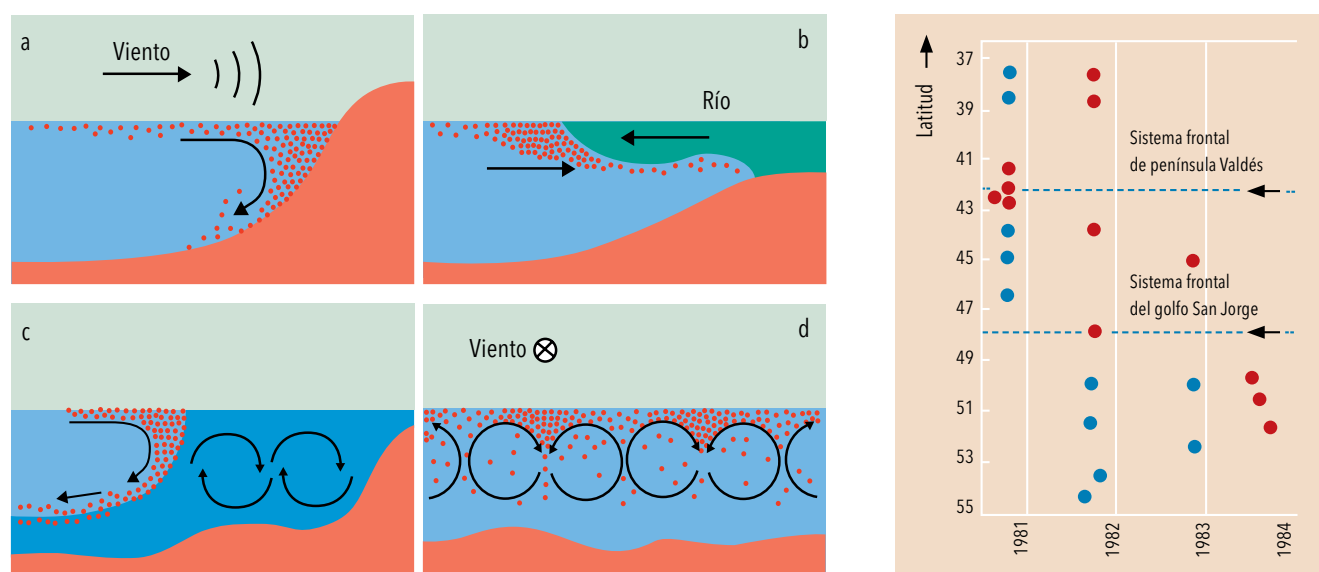


Figura 5. La acumulación de organismos por procesos físicos tiene lugar en los puntos donde el agua tiende a hundirse, mientras dichos organismos flotan o nadan hacia la superficie. Esto puede ocurrir por: a) efecto del viento; b) agregación de un flujo de agua; c) acción de fuertes mareas, y d) formación de celdas de Langmuir bajo la acción de vientos moderados (perpendiculares a la página).

Figura 6. Expansión del área tóxica en el Mar Argentino durante el período 1980-1984. Los puntos rojos corresponden a muestreos que revelaron toxicidad mientras que los puntos azules corresponden a muestreos que no la revelaron.

es tarea difícil. Una de las especies mejor conocidas, el dinoflagelado formador de algas *Gymnodinium* (= *Ptychodiscus*) *breve*, es responsable de la mortandad de peces y otros organismos en la costa de Florida, Estados Unidos. Estos florecimientos llegan a tener, incluso, efectos secundarios sobre el hombre a causa de la inhalación de aerosoles que contienen células tóxicas. Se han detectado unas pocas intoxicaciones humanas debidas al consumo de moluscos que concentran las toxinas provenientes de este dinoflagelado. En la actualidad, se conocen al menos cinco toxinas producidas por el *Gymnodinium breve* (figura 7a). Su estructura química es extremadamente compleja y sin precedentes en ningún producto natural; solo en 1981 y como resultado de un estudio conjunto de cuatro universidades norteamericanas se pudo determinar la estructura de una de ellas, la denominada brevetoxina-B.

Pero no es este el único caso que refleja el dramático hecho de que estas toxinas provocan por un lado severísimos perjuicios y se resisten por otro a entregar la clave de su íntima estructura. Tomemos, por ejemplo, la inusual 'marea parda' que se produjo en 1985 en la bahía de Narragansett, Estados Unidos. El fenómeno tuvo tremendos efectos sobre el zooplancton y el mejillón; provocó, además, una gran disminución de las larvas bentónicas, de los bancos de algas macrofitas y de la anchoíta. La especie —el flagelado *Aureococcus anophagefferens*— ha sido identificada, pero no se conoce aún la naturaleza de las toxinas.

En mayo de 1988, en las costas de Suecia, Noruega y Dinamarca tuvo lugar un florecimiento excepcional producido por un flagelado (*Chrysochromulina polylepis*), inadvertido hasta entonces por los planctólogos. Como consecuencia del fenómeno se produjo una mortandad de peces naturales y de cultivo, de invertebrados y de algas

macroscópicas. Aunque se desconoce la naturaleza de la toxina, parece que actúa a nivel de la membrana celular, destruyéndola. Estas y otras anomalías recientes han llevado a modificar el nombre de la IV Conferencia Internacional de Dinoflagelados Tóxicos por el de IV Conferencia Internacional sobre Fitoplancton Marino Tóxico, con la intención de incluir los nuevos episodios.

Un grupo de especies de dinoflagelados, sobre todo del género *Gonyaulax* (= *Alexandrium*), produce uno de los venenos más poderosos que se conocen. Aunque el nombre genérico del mismo es el de 'veneno paralizante de moluscos', se reconoce la existencia de al menos trece toxinas de este grupo (figura 7b). Todas ellas están estructuralmente relacionadas con la saxitoxina, cuya estructura fuera dilucidada en 1975 luego del aislamiento y la purificación de la almeja gigante de Alaska (*Saxidomus giganteus*). Estas toxinas son poderosos venenos que bloquean el sistema nervioso central (centro respiratorio y vasomotor) y el sistema nervioso periférico (unión neuromuscular, terminaciones cutáneas, táctiles, etcétera), produciendo una depresión respiratoria que puede causar la muerte por anoxia y el colapso cardiovascular por depresión del miocardio. Los vertebrados son particularmente sensibles a estas toxinas y también lo son algunos invertebrados, pero este no es el caso de muchos moluscos bivalvos que se manifiestan extremadamente resistentes a ellas. Esta capacidad les permite alimentarse con algas tóxicas y, lo que es más peligroso, acumular la toxina en sus glándulas y tejidos. Por esta razón los moluscos bivalvos se tornan extremadamente peligrosos en las áreas donde florecen tales dinoflagelados; en casos extremos basta la ingestión de dos o tres ejemplares para producir una intoxicación fatal.

La capacidad de los dinoflagelados para sintetizar este tipo de toxinas difiere no solo a nivel genérico y específico, sino también intraespecífico. Esta es una complicación adicional ya que distintas cepas de una misma especie pueden ser o no ser productoras de toxinas. Recientemente se ha señalado que una cianofita de agua dulce (*Aphenizonemon flos-aquae*) y un alga roja multicelular (*Jania* sp.) también las producen. Una distribución tan amplia y a la vez azarosa parece estar relacionada con la existencia de bacterias intracelulares asociadas a la producción de estas toxinas.

Otro tipo de intoxicación denominado 'envenenamiento diarreico por moluscos', se origina en el crecimiento limitado (de $2,10^4$ a $4,10^4$ células/litro) de algunos dinoflagelados del género *Dinophysis* (*D. acuminata*, *D. fortii*). Aunque estos organismos no se reúnen en grandes poblaciones, los moluscos bivalvos tienen la capacidad de concentrar las toxinas y su ingestión produce desórdenes gastrointestinales que generalmente cesan luego de uno o dos días. La estructura de estas toxinas ha sido recientemente dilucidada y se las ha agrupado en dos tipos principales (figuras 7c y 7d).

Resulta, pues, imprescindible distinguir los fenómenos de mareas rojas de los de toxicidad, aun cuando en muchos casos estén asociados. Una marea roja puede ser causada por el florecimiento excepcional de una especie no tóxica, y la toxicidad de moluscos bivalvos se puede originar en la acumulación de toxinas producidas por un dinoflagelado presente en concentraciones relativamente pequeñas. La asociación de ambos fenómenos, es decir una marea roja tóxica, es una situación excepcional y de extremo peligro para la biota y la salud de la población.

Las mareas rojas aparecen en nuestros días como un fenómeno en expansión (figura 8). Debe señalarse, sin embargo, que carecemos de la información necesaria para poder asegurar que las alteraciones hoy registradas sean sucesos exclusivos de nuestro tiempo, ya que podríamos estar atravesando una fase dentro de un ciclo normal de larga duración. Pero lo cierto es que la expansión existe, y el problema es grave y de absoluta actualidad.

Una de las explicaciones mejor fundadas señala la contaminación de las aguas en las zonas estuariales o costeras de circulación restringida como principal responsable del incremento de las mareas rojas. La situación del mar interior del Japón resulta un buen ejemplo para ilustrar esta correspondencia entre contaminación y florecimientos excepcionales; prueba, también, que estos disminuyen cuando se implementan medidas adecuadas para mejorar la calidad de las aguas (figura 9). Esta experiencia ha sugerido que la magnitud de los florecimientos está parcialmente relacionada con los aportes de materia orgánica (vitaminas y sustancias quelantes) y de nutrientes inorgánicos. En esta área, como en otras bahías semicerradas o estuarios, el efecto de la

hipernutricación se conjuga, para favorecer las mareas rojas, con la estabilidad física del ambiente. Pero esta manera de explicar el auge del fenómeno que nos ocupa no puede dar razón de los florecimientos excepcionales que se producen con frecuencia cada vez mayor en áreas donde los efectos de la contaminación pueden suponerse despreciables. El suceso de 1980 en el Mar Argentino, frente a la península Valdés, ejemplifica este tipo de circunstancia.

Recientemente, y a modo de hipótesis, se ha señalado la posible conexión entre el desarrollo de mareas rojas y el incremento de la radiación ultravioleta como consecuencia de la disminución de la capa de ozono. Esta teoría se basa en el hecho de que los dinoflagelados, como otros organismos primitivos, existían en los tiempos en que dicha capa estaba en formación y debieron desarrollar entonces sistemas de protección ultravioleta. Pero de este tema ya nos hemos ocupado.

Con el fin de disminuir o eliminar los efectos nocivos de las mareas rojas, resulta absolutamente imprescindible implementar sistema de predicción y control. A pesar de los diversos modelos desarrollados, la predicción de los fenómenos sigue presentando innumerables dificultades. El típico carácter monoespecífico de estos florecimientos aparece como una ventaja, ya que permite utilizar el patrón ecológico de la especie como representante de toda la comunidad. Sin embargo, como cada una de las especies tiene distinto comportamiento, los modelos desarrollados para una de ellas no suelen ser aplicables a las demás o a áreas con diferentes condiciones fisicoquímicas. Un factor adicional de complicación es la diversidad genética de las especies formales.

En algunos casos, como en el Japón en la década de 1930, se ha intentado controlar las mareas rojas adicionando sulfato de cobre al agua en que se desarrollaban experiencias con ostras cultivadas. Aunque los dinoflagelados son más sensibles que las diatomeas y otros organismos marinos al efecto tóxico del cobre, su poca especificidad lo torna inapropiado. Tampoco ha tenido éxito el desarrollo de otros agentes químicos de control, ya que no se conoce ninguno que sea letal solo para los dinoflagelados. Por otra parte, su uso práctico resulta antieconómico aun en áreas semicerradas de escasas dimensiones. El control biológico es sin duda preferible al químico, pero su desarrollo se encuentra aún en un ámbito especulativo.

En la actualidad, el único medio para prevenir las intoxicaciones humanas es el control permanente de las poblaciones de moluscos bivalvos. Este sistema, sin embargo, no soluciona el problema de las pérdidas económicas resultantes de los períodos de veda que son en muchos casos de larga duración. Una solución práctica a este problema es la detoxificación inducida a escala industrial. De los diversos métodos existentes para lograrla, el uso de ozono parece ser el más efectivo.

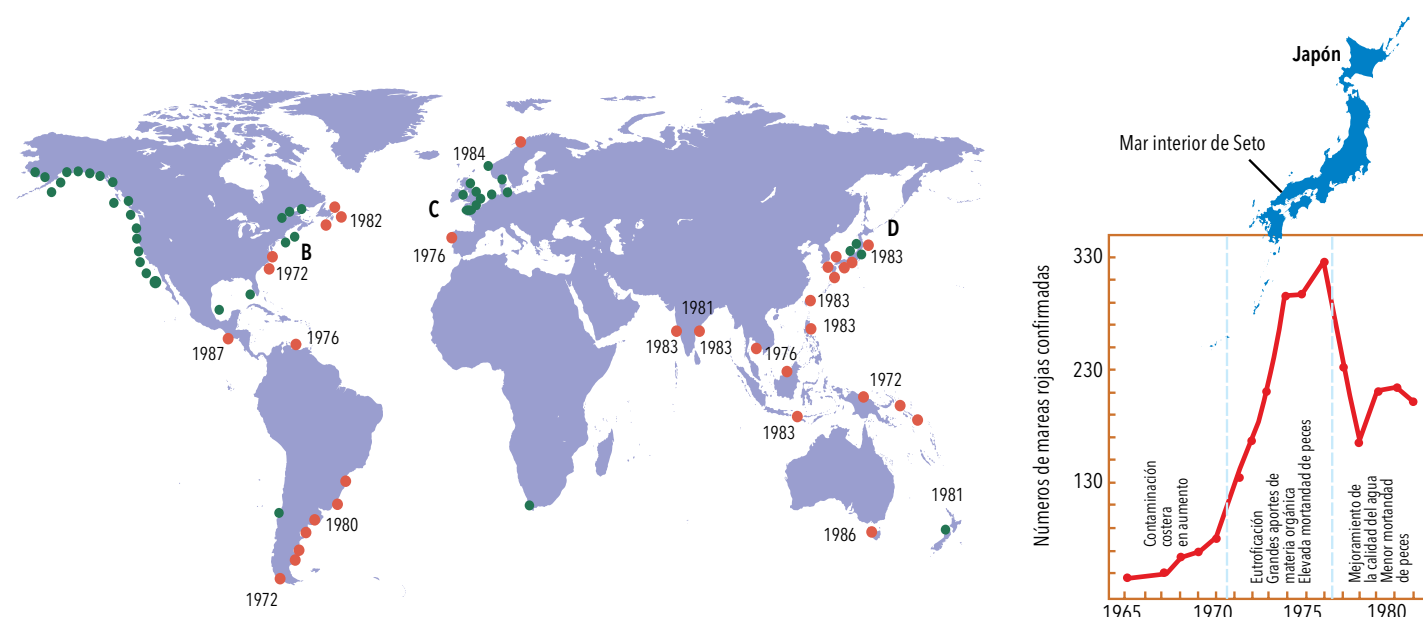
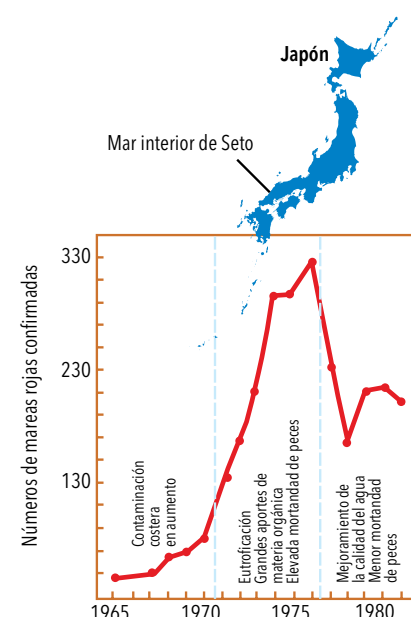


Figura 8. Distribución mundial de intoxicaciones por veneno paralizante de moluscos. Los puntos verdes corresponden a los registros obtenidos hasta 1972 y los rojos, de 1972 a la actualidad. Las letras A, B, C y D señalan áreas endémicas tradicionales.

Figura 9. Relación entre el número de mareas rojas detectadas en el mar interior de Seto, Japón, y los procesos de contaminación del agua.



LOS FLORECIMIENTOS DE ALGAS NOCIVAS (FAN) SIGUEN INCREMENTÁNDOSE ACTUALIZACIÓN

En los años transcurridos desde que se publicó este artículo, la frecuencia, la distribución geográfica y la intensidad de los FAN han seguido incrementándose, tanto a nivel local como a nivel global. Esta tendencia se ha acompañado de un notable incremento en el número de especies identificadas de microalgas productoras tanto de las toxinas ya conocidas (neurotoxinas del grupo de la saxitoxina, neurotoxinas del grupo de la brevetoxinas, toxinas diarreas del grupo del ácido okadaico, toxinas diarreas del grupo de las pectenotoxinas, yessotoxinas, palytoxina y toxinas de cianobacterias) como de toxinas anteriormente desconocidas, cuya estructura y efectos, solo recientemente han sido dilucidadas (ácido domoico, ciguatoxinas, gambiertoxinas, maitotoxinas, azoespirácidos, espirolidos, pinnatoxinas, gymnodiminas, etcétera). Además, el número de congéneres conocidos en un determinado grupo de toxinas (toxinas de estructura similar pero diferente toxicidad específica) es hoy muy elevado, lo que ocasiona una complicación adicional en su identificación, que requiere la aplicación de métodos de análisis sofisticados. A modo de ejemplo, se señala que el número de análogos de la yessotoxina ha sido estimado en alrededor de 100 compuestos. Aunque se ha sostenido la existencia de una relación causal entre la eutrofización y el incremento de los FAN, otras modificaciones ambientales de origen antropogénico deben ser también consideradas. El calentamiento global implica la formación de zonas superficiales de mayor estabilidad, donde las especies capaces de soportar una mayor dosis diaria de radiación solar (especialmente de radiación ultravioleta), están favorecidas. Además, la estimulación de la fotosíntesis debida al aumento de la pCO₂ en la atmosfera, la calcificación reducida por la acidificación oceánica, las elevadas precipitaciones y las eventuales tormentas que producen cambios en el escurrimiento terrestre y por ende en la disponibilidad de micronutrientes y material orgánico disuelto, pueden también producir respuestas diferenciales entre las distintas especies de microalgas y, aun, entre cepas de una misma especie. Sin embargo, el escaso conocimiento que tenemos acerca del potencial que tienen las distintas especies de microalgas marinas para adaptarse (genéticamente y fenotípicamente) a los cambios ambientales producidos por el hombre, es causa de una elevada incertidumbre en la valoración de dichas relaciones causales.

Los florecimientos tóxicos en el Mar Argentino

Aunque en el Mar Argentino se ha observado un fuerte incremento de los FAN, en este recuadro solo se tendrán en cuenta los florecimientos de las especies que producen toxinas:

Especies productoras de toxinas paralizantes de moluscos (TPM)
La primera documentación de la ocurrencia de *Alexandrium tamarense* (= *A.*

excavatum) en Sudamérica fue obtenida en 1980, en península Valdés. Con el tiempo, esta especie se expandió hacia el norte hasta llegar ocasionalmente al sur del Brasil. La primera floración de *Gymnodinium catenatum* fue registrada en 1992, en la región estuarial del Río de La Plata. Desde entonces, las floraciones de esta especie son un fenómeno recurrente. En la región de Tierra del Fuego la especie productora de los florecimientos tóxicos es el dinoflagelado *Alexandrium catenella*. Aunque detectados por vez primera (1972) en los canales fueguinos (Chile), estos florecimientos se han incrementado notablemente, tanto en su extensión geográfica y persistencia temporal como en la magnitud de los niveles de toxicidad detectados en los moluscos. En los moluscos del canal Beagle (Argentina), durante el verano de 1990, se registraron los máximos valores mundiales de TPM.

Especies productoras de toxinas amnésicas de moluscos (TAM)
Varias especies de diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*, productoras (potenciales) de TAM, han sido observadas en la mayoría de los ecosistemas del Mar Argentino. Sin embargo, a pesar de que en algunos casos su importancia cuantitativa fue relativamente elevada, no se han registrado intoxicaciones humanas por ingestión de TAM (ácido domoico). No obstante, se ha confirmado que las poblaciones naturales de *P. australis* y *P. multiseriata* producen cantidades significativas de TAM que son transferidas a niveles tróficos superiores.

Especies productoras de toxinas diarreas de moluscos (TDM)
En casi todos los ecosistemas del Mar Argentino ha sido observada la presencia de varias especies de dinoflagelados del género *Dinophysis*, productoras (potenciales) de TDM. Dos de ellas, *D. caudata* y *D. acuminata*, han sido asociadas con la presencia de toxinas diarreas en almejas (*Mesodesma mactroides*), berberechos (*Donax hanleyanus*) y mejillones (*Mytilus edulis platensis*). Recientemente (2010), los florecimientos de estas especies tuvieron como consecuencia un episodio de intoxicación diarreaica en personas que ingirieron berberechos colectados en las playas de Villa Gesell. Sin embargo, el primer episodio de intoxicación diarreaica de moluscos en nuestro país se detectó en Puerto Madryn (2001), identificándose el organismo causal como el dinoflagelado bentónico *Prorocentrum lima*.

Otras especies tóxicas
Otras especies potencialmente tóxicas como *Azadinium spinosum* (azoespirácidos), *Alexandrium ostenfeldii* (spirolicos) y *Protoceratium reticulatum* (yessotoxinas) han sido reconocidas en el Mar Argentino, aunque es poco lo que se conoce sobre su ecología y toxigenicidad.

¿Un mar de gelatina?

No sería raro que algún lector, caminando a la orilla del mar en una playa de suave pendiente, haya visto en el agua, cerca de la costa y donde solo había escasos centímetros de profundidad, flotar una gran cantidad de medusas (más comúnmente llamadas aguas vivas en estas latitudes y en inglés jellyfish, peces de gelatina). Es también posible que, al observar el fenómeno, le haya llamado la atención el hecho de que dicha aglomeración de medusas –llamada por los biólogos marinos un banco– estaba sujeta a un desplazamiento un tanto errático, que obedecía más al vaivén de las olas que a sus propios impulsos. La realidad es que, en la situación advertida por el hipotético lector, esos organismos marinos –que, en muchos casos, miden unos 50 centímetros de diámetro y están dotados de brazos en torno a su boca– habían sido víctimas de las corrientes

costeras, el viento y las mareas, y se encontraban sin la capacidad de vencer la fuerza de arrastre del agua. Tras el descenso de la marea, miles quedarían tirados sobre la arena (figura 1). Accidentes como ese, que diezman a poblaciones enteras, se producen porque las medusas necesitan de cierta profundidad de agua para movilizarse a impulsos de sus contracciones, y para no quedar a la merced de los elementos y de su propia inconsistencia, como supuestamente habría sucedido en el imaginario caso relatado. A pesar de su aparente fragilidad, las medusas son organismos muy antiguos en la escala del tiempo geológico. Hay evidencias de que habitaban los mares ya en el período cámbrico, que terminó hace unos 500 millones de años. Sus características anatómicas (figura 2) fueron lo suficientemente adecuadas como para que sobreviviesen desde entonces hasta el presente, por más que recientes

LECTURAS SUGERIDAS



ANDERSON DM WHITE AW & BADEN DG (eds.), 1985, *Toxic Dinoflagellates*, Elsevier.
BALLECH E, 1977, *Introducción al fitoplancton marino*, Eudeba, Buenos Aires.
CARRETO JI, LASTA ML, NEGRI RM y BENAVIDES HR, 1981, *Los fenómenos de marea roja y toxicidad de moluscos bivalvos en el Mar Argentino*, contribución INIDEP, N° 399, Mar del Plata.
CARRETO JI, BENAVIDES HR, NEGRI RM & GLORIOSO M, 1986, "Toxic red tide the Argentine Sea. Phytoplankton distribution and survival of the toxic

dinoflagellate *Gonyaulax excavata* in a frontal area', *Journal of Plankton Research*, vol. 8, p. 15.
MARGALEF R, 1978, 'Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment', *Oceanologica Acta*, vol. 1, p. 493.
OKAICHI T, ANDERSON DM & NEMOTO T (eds.), 1988, *Red-tides: Biology, Environmental Science and Toxicology*, Elsevier.
TAYLOR FJR (ed.), 1987, *The Biology of Dinoflagellates*, Blackwell.

¿DE QUÉ SE TRATA?

Los celentéreos o celenterados forman un gran grupo de invertebrados marinos que incluye a hidras, corales, pólipos y medusas. Hasta el siglo XVIII se los consideraba plantas. El público que concurre a balnearios marinos suele tener dolorosos encuentros con las últimas.